

УДК 622.281.406:539.3

Шматовский Л.Д., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Сапунова И.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Зайцев М.С., канд. техн. наук,
Ананьева О.И., магистр,
Тынына С.В., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ АРМОПОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК

Шматовський Л.Д., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Сапунова І.О., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Зайцев М.С., канд. техн. наук,
Ананьева О.І., магістр,
Тинина С.В., канд. техн. наук
(ІГТМ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ АРМОПОРОДНИХ ОБОЛОНОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ВИРОБОК

Shmatovskiy L.D., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Sapunova I.O., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Zaitsev M.S., Ph.D. (Tech.),
Ananeva O.I., M.S. (Tech.),
Tynyna S.V., Ph.D. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

THE STUDY OF ROCK REINFORCED CASINGS IN TERMS OF IMPROVING STABILITY OF THE MINE TUNNELS

Аннотация. На основе выполненных теоретических, лабораторных и натуральных исследований получено решение важной задачи повышения устойчивости подземных выработок путем упрочнения приконтурного породного массива. Обоснованы принятые математические модели и разработана методика аналитических исследований, которая дает возможность установить определяющие закономерности поведения армированных грузонесущих породобетонных образований. Установленные основные закономерности и особенности изменения поля напряжений и деформаций армопородного контура выработки под влиянием горного давления, позволили разработать методику создания и обоснования параметров армопородных оболочек. Это подтверждено результатами инструментальных наблюдения в лабораторных и шахтных условиях. Экономическая эффективность достигается в первую очередь за счет уменьшения металлоемкости стационарной крепи.

Ключевые слова: горная порода, анкерная крепь, инъекционное упрочнение, моделирование, метод эквивалентных материалов, бетонная смесь.

Введение. В последние годы наметилась прогрессивная тенденция использовать несущую способность массива для охраны капитальных и подготовитель

ных выработок путем направленного изменения его состояния и свойств. Это реализуется за счет различных способов, обеспечивающих уменьшение материалоемкости крепей.

Наиболее перспективным остается направление повышения устойчивости выработок посредством упрочнения приконтурного породного массива и вовлечение его в процесс противодействия горному давлению. Опыт эксплуатации магистральных подготовительных выработок показал, что в условиях глубоких шахт Донбасса эффективным способом повышения устойчивости выработок является тампонаж в комбинации с рамно-анкерным креплением.

При этом максимальный эффект от упрочнения приконтурного массива может быть достигнут лишь при использовании безусадочных тампонажных растворов [1-6].

В связи с этим повышение устойчивости выработок путем образования армопородных оболочек в условиях глубоких горизонтов шахт Донбасса является актуальной научной задачей, имеющей важное значение для угледобывающей отрасли Украины.

Результаты исследования.

Исследование армопородных оболочек производилось на основе теоретических, лабораторных и натурных исследований.

На первом этапе экспериментальных и теоретических работ анализ полученных результатов показал:

- введение в цементно-песчаный раствор добавки фосфогипсо-известкового спека не оказывает существенного влияния на его подвижность, в то время как добавка золы улучшает подвижность;

- оптимальная подвижность и повышение седиментационной устойчивости цементно-песчаного раствора с добавками золы и фосфогипсо-известкового спека может быть обеспечена при водоцементном соотношении $V/C = 1,8$ и $C/Z = 0,25$;

- введение фосфогипсо-известковых спеков и 25 % золы практически не изменяют сроков схватывания тампонажного раствора;

- разогрев массы при затворении тампонажного раствора с добавкой золы на 5-6 °С ниже по сравнению с раствором без добавки золы.

Следующий этап работ предусматривал исследование свойств тампонажного камня. При этом в тампонажный раствор добавлялись фосфогипсо-известковые спекы и зола различного количественного содержания. Из анализа полученных результатов следует, что:

- введение в тампонажный раствор 5 % фосфогипсо-известковых спеков не вызывает значительного самоупругения. В этом случае давление расширения $\sigma_s \approx 0,3$ МПа;

- максимальным самоупругением обладает твердеющий тампонажный раствор и камень с добавкой 10 % спека. В этом случае самоупругение $\sigma_s \approx 1,6$ МПа;

- при содержании в тампонажном растворе 7 % добавки фосфогипсо-известковых спеков самоупругение $\sigma_s \approx 0,86$ МПа;

- лучшим по самоупругости является тампонажный раствор с добавкой 7 % фосфогипсо-известковых спеков, так как в этом случае обеспечивается получение тампонажного раствора со средней энергией самоупругости;

- самоупругость твердеющего цементно-песчаного тампонажного раствора и камня с добавкой золы и фосфогипсо-известковых спеков в 1,4-1,7 раза ниже, чем тампонажного раствора на основе портландцемента и фосфогипсо-известковых спеков.

Самоупругость тампонажного камня можно определить по формуле;

$$\sigma_s = 0,19K_p q_0 \varepsilon, \quad (1)$$

где $q_0 = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E a^{-1}$; ε - величина свободного линейного расширения

твердеющего тампонажного раствора; a - радиус цилиндрического стакана с поршнем; E - модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; K_p - поправочный коэффициент.

Численные значения величины самоупругости σ_s могут быть получены после определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, которые определяются экспериментально.

Для аналитического определения параметров самоупругости тампонажного камня принято, что расширение тампонажного раствора и камня происходит в жесткой цилиндрической обойме. В результате решения уравнений равновесия определены расчетные зависимости для компонент тензора напряжений, описывающих напряженное состояние тампонажного камня при известной величине свободного линейного расширения и выполнен численный расчет параметров самоупругости тампонажного камня, позволивший установить простую аналитическую зависимость для определения самоупругости тампонажного камня.

Упругие свойства тампонажного камня, полученные при статическом и динамическом нагружениях, по величине отличаются между собой вследствие различия характера деформирования камня.

Последнее обстоятельство при рассмотрении результатов определения давления расширения тампонажного материала обязывает установить зависимость между динамическим $E_{дин}$ и статическим $E_{ст}$ модулями упругости. Исследования возможности использования динамического модуля $E_{дин}$ для вычисления $E_{ст}$ проведены в лаборатории отдела механики горных пород ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины.

В лаборатории были изготовлены и исследованы образцы тампонажного камня с различным составом и видом заполнителя.

В результате корреляционного анализа произвольной выборки данных статических и динамических испытаний 62 проб горных пород получены уравнения корреляционной связи между $E_{ст}$ и $E_{дин}$

$$E_{cm} \approx 0,7 E_{дин} + 13,8 \cdot 10^2, \text{ МПа}, \quad (2)$$

которые вполне удовлетворяют необходимой точности в процессе исследования самонапряженности твердеющего тампонажного раствора.

Для изготовленных образцов тампонажного камня определялись модуль упругости (модуль Юнга) и коэффициент Пуассона, которые используются для определения величины самонапряжения твердеющего тампонажного раствора и камня; образцы исследовались на сжатие и растяжение.

В результате исследований образцов на сжатие и изгиб установлено, что при твердении их в условиях полного ограничения расширения прочность тампонажного камня на изгиб возрастает примерно на 10 %, а на сжатие снижается на 4 %.

Также установлено, что для затампонированного приконтурного массива, состоящего из песчаника, нижний предел прочности в 2 раза больше, чем для массива, состоящего из алевролита, и в 3 раза больше, чем для массива, состоящего из аргиллита.

По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработана рецептура инъекционного раствора для упрочнения приконтурных пород горных выработок [1].

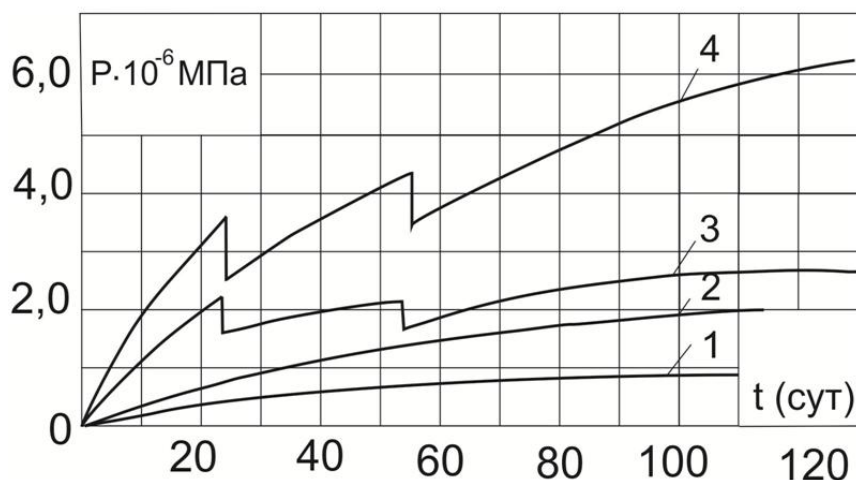
Экспериментальная часть работ проводилась в условиях шахт Западного Донбасса.

На экспериментальных участках Восточного откаточного и вентиляционного Западного откаточного магистральных штреков шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь» проведены замеры горного давления на арочную податливую крепь (рис.1) и конвергенции контура выработок, в результате которых установлено:

- наибольшая интенсивность нарастания давления на крепь наблюдается в первые 25 суток, а максимум давления – на 110-е сутки после установки крепи;
- давление на крепь с подкрепленным контуром в шесть раз меньше, чем давление на крепь без подкрепления контура [5,6];
- при неподкрепленном контуре характерно скачкообразное проскальзывание элементов податливой крепи в замках, а при подкрепленном контуре прерывания в замках не наблюдалось, давление нарастает плавно со скоростью, вдвое меньшей, чем скорость нарастания давления при неподкрепленном контуре;
- упрочнение нарушенных приконтурных пород строительной смесью на основе портландцемента с расширяющимися добавками фосфогипсоизвестковых спеков уменьшает смещения кровли и боков в среднем на 58 %;
- при увеличении давления инъекционного раствора в вертикальных скважинах наблюдалось уменьшение смещений кровли и боков более, чем в 2,5 раза.

В соответствии с геологическим разрезом горных пород, вмещающих пласт m_3 , по эмпирическим формулам осуществлен подбор эквивалентных бетонных смесей и раствора, которые бы удовлетворяли требованиям механического по-

добия при моделировании процессов деформаций и разрушений упрочненных пород, окружающих выработку.



1 и 2 – боковое и вертикальное давление, замерный участок 4/1, 3 и 4 – боковое и вертикальное давление, замерный участок 3/6

Рисунок 1 – Кривые давления на арочную податливую крепь в зависимости от времени

По результатам расчета по эмпирическим формулам изготовлены образцы и определены физико-механические свойства затвердевших эквивалентных бетонных смесей и раствора. Установлено, что результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств эквивалентных материалов и результаты расчета по эмпирическим формулам отличаются в среднем на 13 % [7].

Следовательно, при подборе эквивалентных материалов для моделирования процесса конвергенции упрочненного контура выработки достаточно ограничиться расчетом по эмпирическим формулам.

Проведены испытания модели арочной крепи на предмет податливости замковых соединений. Испытания показали, что в пределах конструктивной податливости замковых соединений элементы модели крепи работают без деформаций.

Изготовлено четыре модели, проведены их испытания (рис.2) и осуществлен их сравнительный анализ.

В результате компьютерной обработки результатов испытаний установлено:

- потеря устойчивости выработки для всех моделей имеет место при смещениях кровли 1,5-2 мм;

- устойчивость армопородной оболочки, где при инъекционном упрочнении приконтурных пород использовался самонапрягающийся тампонажный раствор, на 15 % выше устойчивости такой же оболочки, где тампонаж приконтурных пород осуществлялся раствором на основе бездобавочного портландцемента;

- анкерная податливая крепь на 20 % повышает устойчивость выработки.

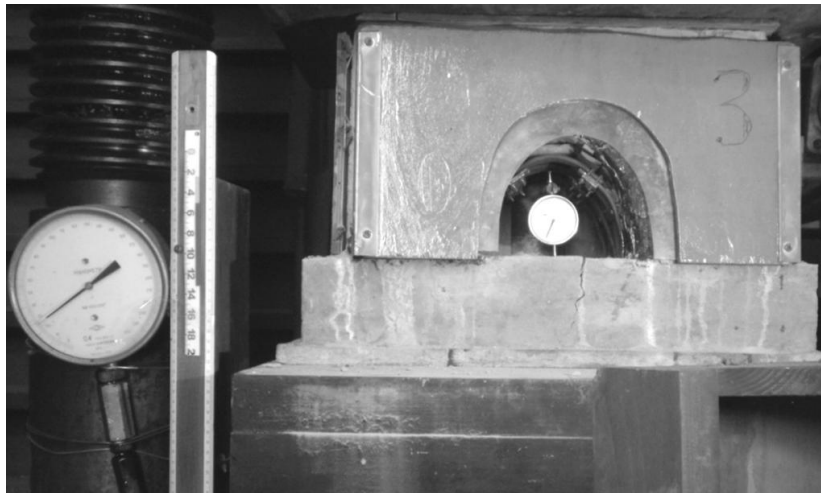


Рисунок 2 - Деформационные испытания модели

Напряженно-деформированное состояние незакрепленного и омоноличеного армопородного контура выработок с подкрепляющими и распорными элементами в неравнокомпонентном поле напряжений определялись численным моделированием. В результате чего получены расчетные аналитические зависимости для компонент поля напряжений и деформаций в приконтурной зоне выработанного пространства.

Анализ полученных численных результатов показал, что:

- в поперечных сечениях армопородной оболочки, образовавшейся в результате выполнения тампонажных работ после начала движения нарушенных приконтурных пород, имеют место сжимающие напряжения (рис. 3). Наивысшая концентрация нормальных радиальных σ_{rr} и тангенциальных $\sigma_{\theta\theta}$ напряжений имеет место в сечениях $\theta = \pi/2$ и $\theta = 0$, а наивысшая концентрация касательных $\sigma_{r\theta}$ напряжений в сечениях $\theta = \pi/4$;

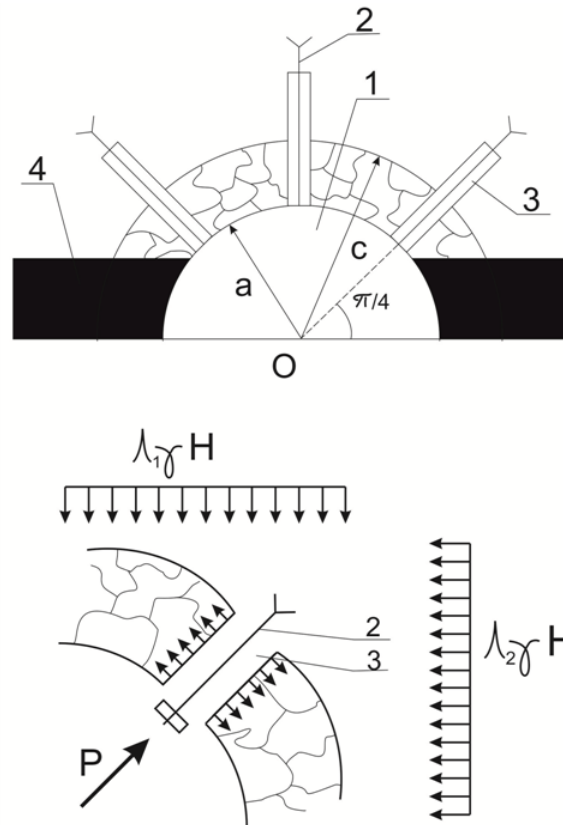
- увеличение относительной толщины тампонажной оболочки ($0,25 \leq h/a \leq 0,65$) приводит к снижению напряжений (в 1,8 раза) и более равномерному распределению параметров напряженно-деформированного состояния и, как следствие, к улучшению условий работы постоянной крепи;

- создание условий для всестороннего обжатия пород приводит к снижению концентрации касательных напряжений;

- анкерное подкрепление и уплотняющее действие тампонажного раствора уменьшает в среднем на 30 % радиальные смещения по сравнению со смещениями неподкрепленного затампонируемого породного контура выработки;

- в кровле выработки, приконтурная зона которой упрочняется непосредственно вслед за подвиганием забоя выработки, имеет место зона растягивающих радиальных напряжений, которая с возрастанием относительного внутрискважинного давления $P_0/\gamma H = 0,4$ увеличивается примерно в 1,1 раза по сравнению с давлением $P_0/\gamma H = 0,3$. Тангенциальные напряжения при этом являются сжимающими.

При давлении $0,2 \leq P_0/\gamma H \leq 0,3$ может быть обеспечен перевод массива приконтурных пород в режим объемного сжатия.



1 – выработка, 2 – анкера, 3 - скважины с тампонажным раствором, 4 - угольный пласт

Рисунок 3 - Схема нагружения граничной поверхности армопородной оболочки

Полученные результаты аналитических исследований позволяют утверждать, что изменение физико-механических свойств [3,4] грузонесущих армопородных образований и величины внутрискважинного давления в кровле выработки позволяют определить ряд практических мероприятий по обеспечению устойчивости выработок, например, в условиях слабо метаморфизированных пород.

На основе полученных результатов разработана методика создания и обоснования параметров армопородных оболочек для повышения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт Донбасса, приведенная в работе [8].

Выводы:

1. На основе выполненных теоретических, лабораторных и натурных исследований получено решение важной народно-хозяйственной задачи повышения устойчивости подземных выработок путем упрочнения приконтурного породного массива.

2. В результате проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлено:

- применение расширяющихся строительных смесей на основе портландцемента с расширяющимися добавками фосфогипсо-известковых спеков существенным образом повышает качество омоноличивания нарушенных пород контура выработки, заполнения за счет расширения смеси все разломы и трещины,

при этом изготовление расширяющихся тампонажных растворов осуществляется в производственных условиях;

- использование предложенных расширяющихся и самонапрягающихся инъекционных растворов повышает коэффициент сцепления между породами и раствором в среднем на 30 %, в результате чего перемещения кровли почвы и боков выработки в 1,2-1,5 раза меньше контура, затампонированных раствором на основе бездобавочного портландцемента;

- в условиях слабометаморфизованных углевмещающих пород упрочнение приконтурной зоны выработки следует осуществлять непосредственно вслед за продвижением забоя с тем, чтобы создавать условия для самозаклинивания нарушенных приконтурных пород.

- в натуральных условиях шахт Западного Донбасса анкерное крепление и тампонаж контура выработок строительной смесью на основе портландцемента с расширяющимися добавками фосфогипсо-известковых спеков примерно в 2,5 раза снижает смещения кровли и боков выработки;

- обоснованы принятые математические модели и разработанная на их основе методика аналитических исследований дают возможность установить определяющие закономерности поведения армированных грузонесущих породобетонных образований. Это подтверждено результатами инструментальных наблюдений в шахтных условиях, где натурные измерения показали уменьшение смещений контура выработки примерно в 2,5 раза, в то время как аналитические расчеты дают уменьшение смещений контура примерно на 30-35 %.

В целом использование самонапрягающихся тампонажных растворов, применение анкерной крепи, нагнетание тампонажного раствора под давлением до 6 МПа обеспечивает перевод приконтурного массива в режим обобщенного сжатия, что существенно повышает устойчивость выработки.

3. Расчетный экономический эффект от применения способа упрочнения приконтурной зоны выработки, созданного на основе «Методики» [8], составляет 1245,3 грн. на 1 пог. м. Применение предложенного способа существенно улучшает условия работы стационарной крепи, снижает затраты на поддержание магистральных подготовительных выработок. Значительная экономическая эффективность достигается в первую очередь за счет уменьшения металлоемкости стационарной крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка метода расчета параметров самонапряжения тампонажного камня / Л.Д. Шматовский, А.Н. Коломиец, М.С. Зайцев [и др.] // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 110. – С. 219-230.

2. Перепелица, В.Г. Особенности напряженного состояния горного массива в процессе проведения выработки / В.Г. Перепелица, А.Н. Коломиец, Л.Д. Шматовский // Доповіді НАН України. – 2012. – № 5. – С. 57-61.

3. Методика и оборудование для экспериментальных исследований сопротивляемости напряженных горных пород механическому разрушению / Л.Д. Шматовский, А.Н. Коломиец, М.С. Зайцев [и др.] // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 111. – С. 213-221.

4. Пат. CA2670181 (A1), МКВ E21B10/567, E21B41/00. Discrete element modeling of rock destruction under high pressure conditions, Ledgerwood Leroy W [US], Baker Hughes Inc [US], 05.06.2008.
5. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. - М.: Недра, 2001. - 413 с.
6. Bedard, C. Aitcin pierri-Claude: A la recherche d'un beton de 150 MPa / C. Bedard // *Ganadian journal of civil Engineering*. – 2003. – Vol. 21. - № 4. – P. 600-613.
7. Зайцев, М.С. Методика экспериментальных исследований поведения армопородных оболочек на моделях из эквивалентных материалов / М.С. Зайцев, А.Н. Коломиец, Л.Д. Шматовский // *Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины*. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 118. – С. 55-69.
8. Разработка методики создания и обоснования параметров армопородных оболочек для повышения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт: отчет о НИР / ИГТМ НАН Украины; рук. Л.Д. Шматовский; исп. С.В. Тынына [и др.]. – Днепр, 2016. – Т.7. – 87 с.

REFERENCES

1. Shmatovsky, L.D., Kolomietc, A.N., Zaitsev, M.S. et al. (2013), "Method for computing parameters of grouting rock self-stress", *Geo-Technical Mechanics*, no. 110, pp. 219-231.
2. Perepelitsa, V.G., Kolomietc, A.N. and Shmatovsky, L.D. (2012), "Features stress state in the rock mass in the process of event generation", *Dopovidi NAN Ukrainy*, vol. 5, pp. 57-61.
3. Shmatovsky, L.D., Kolomietc, A.N., Zaitsev, M.S. et al. (2013), "Method and equipment for experimental studying of the stressed rock resistibility to mechanical breaking", *Geo-Technical Mechanics*, no. 111, pp. 213-223.
4. Ledgerwood Leroy W, Baker Hughes Inc, "Discrete element modeling of rock destruction under high pressure conditions", Pat. № CA2670181.
5. Zorin, A.N., Khalimendik, Y.M., and Kolesnikov, V.G. (2001), *Mekhanika razrusheniya gornogo massiva i ispolzovanie ego energii pri dobyche poleznykh iskopaemykh* [Fracture mechanics of the rock mass and the use of its energy for production of mineral resources], Nedra, Moscow, Russia.
6. Bedard, C. (2003), "Aitcin pierri-Claude: A la recherche d'un beton de 150 Mpa", *Ganadian journal of civil Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 600-613.
7. Zaitsev, M.S., Kolomiets, A.N. and Shmatovskiy, L.D. (2013), "Methods for experimental studying of consolidated rock casing behaviour by models made of equivalent materials", *Geo-Technical Mechanics*, no. 118, pp. 55-69.
8. Shmatovsky, L.D., Tynyna, S.V. et al. (2016), *Razrabotka metodiki sozdaniya i obosnovaniya parametrov armoporodnykh obolochek dlya povysheniya ustoychivosti podgotovitelnykh vyrabotok glubokikh shakht: otchet o NIR* [Development of the method of creation and justification armobreed skins settings to enhance the stability of development working in deep mines: Report of research], IGTM NAS of Ukraine, Dnepr, Ukraine.

Об авторах

Шматовский Леонид Дмитриевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

Сапунова Ирина Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

Зайцев Максим Станиславович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела Механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

Ананьева Ольга Ивановна, ведущий инженер отдела Механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

Тынына Сергей Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела Механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

About the authors

Shmatovsky Leonid Dmitrievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Sapunova Iryna Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Zaitsev Maxim Stanislavovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Ananeva Olga Ivanovna, Principal Engineer at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Tynyna Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Анотація. На основі виконаних теоретичних, лабораторних і натурних досліджень отримано рішення важливої задачі підвищення стійкості підземних виробок шляхом зміцнення приконтурного породного масиву. Обґрунтовано прийняті математичні моделі та розроблено методику аналітичних досліджень, які дають можливість встановити закономірності поведінки армованих вагонесучих порідобетонних утворень. Встановлені основні закономірності та особливості зміни поля напружень і деформацій армопорідного контуру виробки під впливом гірського тиску, дозволили розробити методику створення і обґрунтування параметрів армопорідних оболонок. Це підтверджено результатами інструментальних спостереження в лабораторних і шахтних умовах. Економічна ефективність досягається в першу чергу за рахунок зменшення металоємності стаціонарного кріплення.

Ключові слова: гірська порода, ін'єкційне зміцнення, моделювання, метод еквівалентних матеріалів, бетонна суміш.

Abstract. On the basis of theoretical, laboratory and field studies, an important problem of improving the underground tunnel stability was solved by way of strengthening the marginal rock massif. The adopted mathematical models and methods of analytical studies provide an opportunity to determine common tendency of behavior of reinforced carrying rock-concrete formations. The determined main tendencies and specific changes of stress field and deformations of the tunnel reinforced-rock contour caused by epy rock pressure made possible to develop a methodology for creating and studying parameters of the rock reinforced casings. Correctness of this approach is confirmed by results of instrumental observations in laboratory and mine conditions. Economic efficiency is mainly achieved through the reduced metal content in stationary supports.

Keywords: rock, bolting, injecting strengthening, modeling, method of equivalent materials, concrete mix.

Статья поступила в редакцию 12.09.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Дырдой В.И.